黄河流域五大城市群$PM_{2.5}$时空演变与影响因素探讨

慕石雷[1]， 杨玉欢[2]， 乌日陶克套胡[1]

(1. 内蒙古师范大学民族学人类学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；
2. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127)

摘 要：以黄河流域5大城市群82个城市为研究区域，选取2016—2020年中国环境监测总站发布的环境空气颗粒物($PM_{2.5}$)数据，采用空间自相关、地理探测器和地理加权回归等方法，研究$PM_{2.5}$的时空分布特征和空间异质性的主要驱动影响因素。结果表明：(1) $PM_{2.5}$年均值的变化大体呈倒"N"型，季均值变化呈先降后升的周期规律性的"U"型。(2) 在空间分布上，形成了黄河下游>中游>上游的梯度递减空间差异格局，并有逐渐下降的趋势。(3) $PM_{2.5}$演变整体上呈正自相关集聚分布，集聚类型主要为高-高集聚、低-低集聚和低-高集聚类型。(4) 2016年和2020年$PM_{2.5}$空间分异的自然地理因素比社会经济因素的驱动力更强，交互作用结果为双因子增强或非线性增强2种类型。(5) 通过地理加权回归模型对分异探测解释力变化最大的5个因子进行拟合，5 a间各因子对5大城市群$PM_{2.5}$污染的负效应不断提高，正效应呈下降趋势，空间作用方向及强度上差异显著。研究结果为黄河流域5大城市群大气污染防治和环境规制完善提供参考依据，助推黄河流域生态保护和高质量发展。

关 键 词：黄河流域；$PM_{2.5}$；城市群；生态保护；高质量发展

文章编号：1000－6060(2024)04－0707－13(0707～0719)

黄河流域是我国重要的生态安全屏障，在构筑"两屏三带"生态安全战略格局中居于重要地位[1]。黄河流域也被誉为"能源流域"，是我国重要的能源、化工和原材料基地，巨大的以煤为主的能源消耗在推动流域工业化和城镇化进程中，也给生态环境带来巨大的压力，其中由工业污染蔓延的大气污染形势依然严峻[2]。生态环境部通报的2021年1—12月168个重点城市空气质量排名后20位城市名单中，有多达17个位于黄河流域5大城市群[3]。城市群不仅是新型城镇化的主体形态和现代化建设的重要载体，在支撑区域经济增长、促进区域协调发展和参与国际竞争合作等方面发挥带动引领作用，也是空气污染的重灾区，城市群日益演变成"污染群"[4]。$PM_{2.5}$(空气动力学等效直径等于和小于2.5 μm的细颗粒物)是造成大气污染的主要因素，以$PM_{2.5}$为首要污染物的重污染天气不仅危害公众身体与心理健康，影响人民群众对蓝天的获得感和幸福感，也成为制约黄河流域生态保护和高质量发展的瓶颈[5]。

国内外学者在环境细颗粒物$PM_{2.5}$相关的研究上做了大量工作。在$PM_{2.5}$标准方面，美国在1997年制定$PM_{2.5}$的国家大气质量标准，西班牙、加拿大等国也做了相关工作[6]。中国大气污染控制技术与研究发轫于20世纪80年代[7]。2012年2月，出台的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)首次将$PM_{2.5}$纳入环境空气质量新标准，并于2016年1月1日起实施，推动我国空气质量标准与国际逐步接轨[8-9]。在$PM_{2.5}$特性方面，主要分析了化学特征[10]、空间集

收稿日期：2023-02-28； **修订日期**：2023-04-23
基金项目：国家社会科学基金项目(20XMZ060)；内蒙古自治区2023年研究生科研创新项目(B20231052Z)；内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金资助(2022JBXC010)
作者简介：慕石雷(1983-)，男，博士研究生，主要从事民族经济、资源环境经济研究. E-mail: mushilei123@163.com
通讯作者：乌日陶克套胡(1963-)，男，教授，博士生导师，主要从事民族地区经济与社会发展研究. E-mail: wurtkth@imnu.edu.cn

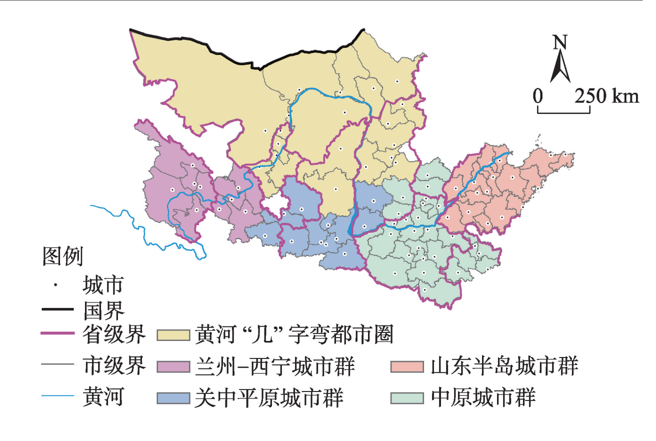
聚性[11]和变异性[12]等。在影响因素方面，主要涉及煤炭消费[13-14]、经济增长[15-16]、城市化[17-18]、工业化[19-20]、技术水平[21-22]、进出口贸易[23-24]、外商直接投资(FDI)[25]、机动车尾气排放[26-27]等社会经济因素和气温[4]、降水量[28]、植被覆盖指数[29]等自然地理因素。在分析方法方面，有空间杜宾模型[4]、STIRPAT模型[30]、地理探测器[28]、地理加权回归[31]等。在研究区域方面，主要以全国[14,16,30]、省域[24-25]、市域[32-34]尺度和城市群[4,28,35-36]为主，对长江经济带[18,29,36]的研究较为丰富，但对黄河流域[28,37]的研究相对薄弱。

在黄河流域城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变及影响因素的研究进展方面，主要运用标准差椭圆[38]、空间自相关[39]揭示黄河流域 $PM_{2.5}$ 的异质性特征；在影响因素方面，主要强调技术创新对 $PM_{2.5}$ 的影响及其空间溢出效应[40]；在研究尺度方面，仅在黄河流域部分城市群，如兰州-西宁城市群[37]、关中平原城市群[28]和沿黄少数城市如济南[32]、太原[33]、兰州[34]等展开研究，对黄河流域5大城市群整体 $PM_{2.5}$ 时空演变格局的研究较少，尤其对影响因素多角度展开的讨论较为匮乏。综上所述，本文以黄河流域5大城市群的82个城市为研究区域，选取2016—2020年中国环境监测总站发布的 $PM_{2.5}$ 数据，综合运用空间自相关、地理探测器和地理加权回归等方法，探测 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征和空间异质性的主要驱动影响因素及因子间的互耦互馈关系，为黄河流域5大城市群大气污染防治和环境规制完善提供决策依据，助推黄河流域生态保护和高质量发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文选取黄河流域从上游至下游的兰州-西宁城市群、黄河"几"字弯都市圈、关中平原城市群、中原城市群和山东半岛城市群5大城市群作为研究对象(图1)。兰州-西宁城市群是黄河上游首个跨省域的城市群，既是维护国家生态安全的战略屏障，也是支撑西北地区发展的重要增长极[37]。黄河"几"字弯都市圈拥有雄厚的能源工业，横跨黄河部分上游和全部中游区域，主要包括宁夏、内蒙古、陕西、山西的19个城市[41]。关中平原城市群以西安市为中心，是亚欧大陆桥的重要支点，是西部地区面向东中部地区的重要门户，横跨甘肃、陕西、山西3



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 黄河流域5大城市群示意图

Fig. 1 Schematic diagram of five urban agglomerations in the Yellow River Basin

省11个城市[28]。中原城市群地处全国"两横三纵"城市化战略格局陆桥通道与京广通道交汇区域，是现代陆路交通的重要枢纽之一[42]，是我国经济由东向西梯次推进发展的中间地带，包括河南、山西、河北、山东、安徽5省29座城市。山东半岛城市群覆盖山东全域16市，对内承接南北，对外毗邻日韩、联通"一带一路"，是黄河流域的主要出海门户[43]。

1.2 数据来源

本文 $PM_{2.5}$ 数据来源于生态环境部中国环境监测总站(http://www.cnemc.cn)。影响 $PM_{2.5}$ 时空分布的自然地理因素中的地形起伏度、植被覆盖指数和净第一性生产力数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)，气温和降水量数据来源于国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn)。社会经济因素中的经济增长、城市化、人口规模、工业规模、科技创新、能源效率、烟尘和粉尘排放量与城市绿化率数据来源于2017—2021年的《中国城市统计年鉴》，公众环境关注度：百度雾霾搜索指数(2016—2020年)数据来源于百度指数(https://index.baidu.com)。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关

(1) 全局莫兰指数：检验不同空间邻近区域单元 $PM_{2.5}$ 的平均相似程度，具体见参考文献[44]。

(2) 局部莫兰指数：衡量一个区域空间单元的 $PM_{2.5}$ 污染与邻近单元的 $PM_{2.5}$ 污染特征的相关程度[4,36]，计算公式为：

$$I_i = \frac{n\left(x_i - \bar{x}\right)\sum_{j=1}^{m} W_{ij}\left(x_j - \bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2},\quad (i \neq j) \tag{1}$$

式中：I_i 为黄河流域5大城市群内 i 城市的局部莫兰指数；$\bar{x}$ 为所有研究单元对应属性值的均值；n 为城市数量；m 为与 i 城市空间上相邻近的城市数量；x_i 和 x_j 分别为城市群内 i 和 j 城市的$PM_{2.5}$年均值；W_{ij} 为邻近城市 i 和 j 的空间权重矩阵。在95%置信区间内，I_i >0时表示 i 城市与邻近单元的$PM_{2.5}$污染呈空间正相关（"高-高"或"低-低"关联），I_i <0时表示 i 城市与邻近单元的$PM_{2.5}$污染呈空间负相关（"高-低"或"低-高"关联）。

1.3.2　地理探测器　地理探测器是探测空间分异格局及影响机制的一种分析工具。本文采用分异探测黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$空间分异影响因子的解释力大小，交互探测识别不同因子间交互作用的影响力强弱，具体见参考文献[45]。

1.3.3　地理加权回归　地理加权回归是Brunsdon等1996年提出的将空间关系异质性和多相性纳入回归分析方法。它引入对不同区域的影响因素进行估计，能够有效捕获各要素对$PM_{2.5}$污染的非平稳影响，描述变量关系随空间变化的特征。本文采用地理加权回归模型探测$PM_{2.5}$空间分异影响因子在局部空间上的作用特征[46]。计算公式为：

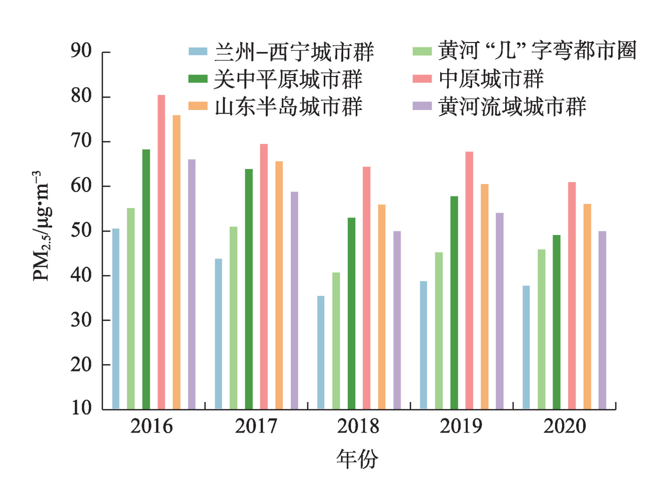
$$y_i = \beta_0\left(u_i, v_i\right) + \sum_{k=1}^{p}\beta_k\left(u_i, v_i\right)X_{ik} + \varepsilon_i \tag{2}$$

式中：i 为观测单位数；(u_i , v_i)为第 i 个样本观测的地理中心坐标；参数 β 为 u_i 和 v_i 的函数，即任何一个具体空间位置的估计参数β是通过局域估计获得的，它随着空间地理位置的不同而变化；X_{ik} (k =1, 2, …, 5)为 i 城市的自变量解释值；$\beta_k(u_i, v_i)$ 为位置 i 第 k 个变量的回归参数；$\beta_0(u_i, v_i)$ 、ε_i 分别为位置 i 的截距项和随机误差项。

2　结果与分析

2.1　时空格局分析

2.1.1　时间分布特征　通过对比黄河流域5大城市群"十三五"时期（2016—2020年）$PM_{2.5}$年均值的变化（图2a），发现城市群的$PM_{2.5}$变化大体呈倒"N"型，从2016—2018年连续3 a一直处于下降趋势，2019年出现反弹升高，2020年又出现下降趋势，总体呈现逐步下降态势。其中，相较于2016年，2020年兰州-西宁城市群$PM_{2.5}$下降了31%，黄河"几"字弯都市圈$PM_{2.5}$下降了21%，关中平原城市群$PM_{2.5}$下降了33%，中原城市群$PM_{2.5}$下降了28%，山东半岛城市群$PM_{2.5}$下降了30%，"十三五"时期$PM_{2.5}$整体下降了29%。2019年出现反弹升高的原因为冷空气活动偏弱、平均风速偏小、小风日数增多和有效降水日数偏少[47]。按照《环境空气质量标准》(GB3095-2012)二级标准(35 μg·m^{-3})的限定，"十三五"期间黄河流域5大城市群中仅有2018—2020年的兰州-西宁城市群和2019年的黄河"几"字弯都市圈达标，



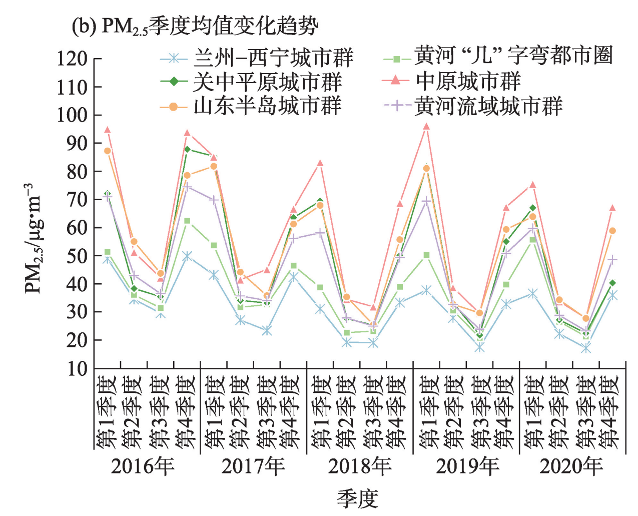


图2　2016—2020年黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$年均值和季均值变化

Fig. 2　Changes of annual and seasonal mean $PM_{2.5}$ in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2016 to 2020

其余年份的城市群均未达标。

5大城市群$PM_{2.5}$季均值变化总体呈先降后升的周期规律性的“U”型，存在第一、四季度高，第二、三季度低的变化特征（图2b）。其中，峰值为中原城市群2019年第1季度的96.24 μg·m^{-3}，低谷为兰州-西宁城市群2020年第3季度的17.15 μg·m^{-3}。总之，黄河流域城市群总体呈冬高夏低、春秋居中的季节变化态势。主要因为黄河流域地处北方，冬季受冷空气西北风影响，气候干燥寒冷，需要燃煤取暖，再加上温度低，风力小等气象条件，导致排放在空气中的细颗粒物积蓄不散，$PM_{2.5}$浓度随之升高[48]。

2.1.2 空间分布特征 黄河流域$PM_{2.5}$的分布呈现出显著的空间异质性（图3）：（1）$PM_{2.5}$的空间分布格局明显，5大城市群$PM_{2.5}$ 5 a均值由大到小的排序为：中原城市群（235.14 μg·m^{-3}）>山东半岛城市群（211.93 μg·m^{-3}）>关中平原城市群（194.22 μg·m^{-3}）>黄河“几”字弯都市圈（150.92 μg·m^{-3}）>兰州-西宁城市群（125.93 μg·m^{-3}）。可见，$PM_{2.5}$污染程度大致形成了黄河流域下游>中游>上游的梯度递减空间差异格局。其中，下游的中原城市群和山东半岛城市群已形成大面积连片重度污染区。（2）2016—2020年$PM_{2.5}$变化明显升高的城市有：关中平原城市群的临汾市、庆阳市、西安市和宝鸡市；黄河“几”字弯都市圈的吕梁市、忻州市；中原城市群的宿州市、阜阳市、淮北市和亳州市；兰州-西宁城市群的临夏回族自治州、定西市。这些城市$PM_{2.5}$污染情况未见明显好转，除了燃煤和工业排放外，区域的地形和气候特征也是导致$PM_{2.5}$污染严重的主要因素[49]。$PM_{2.5}$变化明显降低的城市有：中原城市群的济源市、商丘市；黄河“几”字弯都市圈的晋中市、乌兰察布市、大同市、阿拉善盟和中卫市。除关中平原城市群外，其他4大城市群$PM_{2.5}$变化有逐渐下降的趋势，表明“十三五”时期黄河流域大气污染防治取得较好效果。

2.2 空间自相关分析

以莫兰指数为指标，分别对“十三五”规划的开局和收官之年即2016年和2020年黄河流域5大城市群的$PM_{2.5}$均值进行空间自相关检验，$PM_{2.5}$分布影响因素也主要对这2个年份进行演变分析。空间自相关对比分析（表1）可知，5大城市群$PM_{2.5}$经过5 a的演变表现出空间自相关性各不同，但整体上Moran's I均大于0，且均通过了0.01显著性检验。其中，兰州-西宁城市群$PM_{2.5}$在空间上呈负自相关离散分布，2020年趋近于0，趋于空间随机分布。黄河“几”字弯都市圈$PM_{2.5}$在空间上虽然呈正自相关集聚分布，但2020年也趋近于0，呈随机分布态势。关中平原城市群、中原城市群和山东半岛城市群的Moran's I均大于0，表明$PM_{2.5}$在空间上呈正自相关集聚分布。

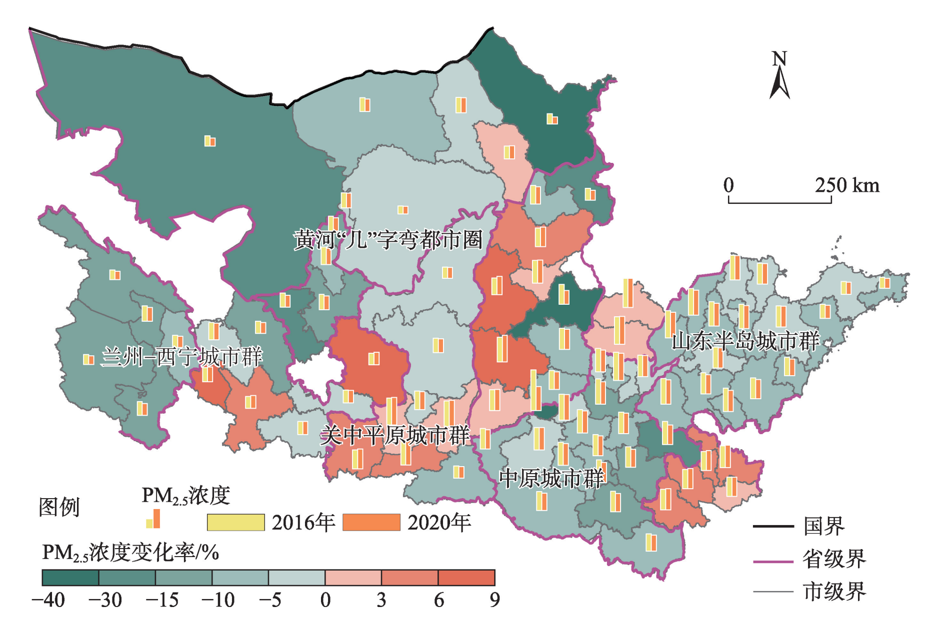


图3 2016—2020年黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$浓度变化率

Fig. 3 Change rate of $PM_{2.5}$ concentration in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2016 to 2020

表1　黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$全局莫兰指数

Tab. 1　Global Moran index of $PM_{2.5}$ in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin

年份	兰州-西宁城市群	黄河“几”字弯都市圈	关中平原城市群	中原城市群	山东半岛城市群	黄河流域城市群
2016年	-0.416***	0.078***	0.263***	0.144***	0.529***	0.481***
2020年	-0.034***	0.040***	0.187***	0.316***	0.537***	0.435***

注:***为1%的显著性水平。下同。

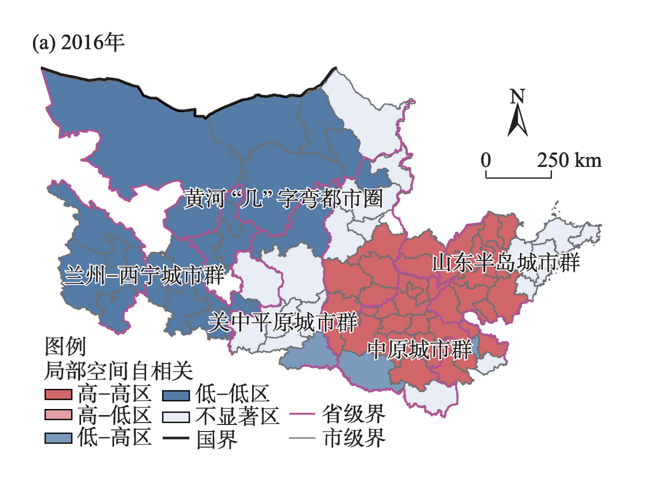
使用局部空间自相关进一步探测5大城市群$PM_{2.5}$空间分布的区域差异。由图4可知,$PM_{2.5}$浓度集聚类型主要为高-高集聚、低-低集聚和低-高集聚类型,未出现高-低集聚。2个年份的高-高和低-低集聚的区域变化不大,仅晋中市、驻马店市和南阳市3个城市由高污染区演变为空气优良区,淮北市却演变为高污染区。从演变趋势来看,高污染区范围在不断缩小。低-低集聚区主要位于黄河流域中上游的兰州-西宁城市群和黄河“几”字弯都市圈,表明这些区域$PM_{2.5}$值较低,是黄河流域长期稳固的$PM_{2.5}$空气质量优良区。高-高集聚区主要分布在下游地区,其中主要分布在中原城市群和山东半岛城市群中西部地区,表明这些区域是黄河流域长期稳固的$PM_{2.5}$高污染区。

3　黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$时空分异的影响因素

$PM_{2.5}$污染的形成与演变、空间分布等受自然地理与社会经济2大方面影响因素的相互交织作用(表2),自然地理因素主要有地形起伏度[28]、气温[4,28-29,36]、降水量[4,28-29,36]、植被覆盖指数[28-29]和净第一性生产力5个因子,社会经济因素主要有经济增长[4,28-29,35]、城市化[4,29,36]、工业化[4,29,35-36]、人口规模[28-29,35]、工业规模[36]、科技创新[30]、能源效率[4,29,31]、烟尘和粉尘排放量[35]、公众环境关注度和城市绿化率[35]10个因子。利用地理探测器的分异和交互作用探测,测算不同驱动因子对黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$空间分布格局的影响程度,并选择2016年和2020年影响因子分异探测差异变化较大的前5个因素,探究$PM_{2.5}$影响因素的空间作用特征。

3.1　分异探测分析

不同因素对黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$的空间分异格局影响程度不同。2016年,$PM_{2.5}$排名前8强的因子为:净第一性生产力(X_5)>地形起伏度(X_1)>气温(X_2)>植被覆盖指数(X_4)>人口规模(X_9)>工业规模(X_{10})>经济增长(X_6)=公众环境关注度(X_{14})。2020年,排名前8强的因子为:净第一性生产力(X_5)>气温(X_2)>地形起伏度(X_1)>植被覆盖指数(X_4)>能源效率(X_{12})>人口规模(X_9)>公众环境关注度(X_{14})>城市绿化率(X_{15})。“十三五”开局和收官之年共同反映出自然地理因素比社会经济因素的驱动力更强,自然地理因素对$PM_{2.5}$污染变化有着显著性影响力。



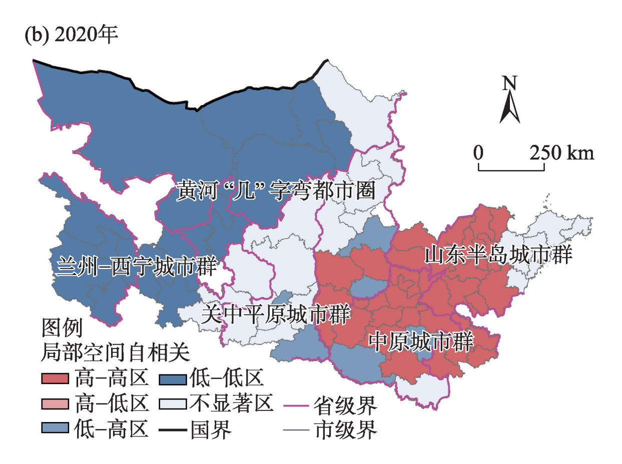


图4　2016、2020年黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$局部空间自相关对比分析

Fig. 4　Comparative analysis of local spatial autocorrelation of $PM_{2.5}$ in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin in 2016 and 2020

表2 黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$空间分布影响因素、因子解释力与分异探测结果

Tab. 2 Influencing factors, explanatory power and differentiation detection results of $PM_{2.5}$ spatial distribution in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin

影响因素	因子	评价指标	单位	q		差距
				2016年	2020年	
自然地理	地形起伏度(X_1)	WAVI	m	0.466***	0.443***	−0.023
	气温(X_2)	年平均气温	℃	0.417***	0.462***	0.045
	降水量(X_3)	年平均降水量	mm	0.085***	0.068***	−0.017
	植被覆盖指数(X_4)	NDVI	−	0.256***	0.301***	0.045
	净第一性生产力(X_5)	NPP	$g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	0.500***	0.546***	0.046
社会经济	经济增长(X_6)	人均GDP	元	0.154***	0.136***	−0.018
	城市化(X_7)	城市人口/总人口	%	0.056***	0.086***	0.030
	工业化(X_8)	第二产业占地区生产总值的比重	%	0.100***	0.101***	0.001
	人口规模(X_9)	常住人口数量	10^4人	0.249***	0.209***	−0.040
	工业规模(X_{10})	规模以上工业总产值	10^4元	0.203***	0.103***	−0.100
	科技创新(X_{11})	专利授权数	件	0.151***	0.159***	0.008
	能源效率(X_{12})	单位GDP工业用电量倒数=GDP/工业用电量	%	0.036***	0.221***	0.185
	烟尘和粉尘排放量(X_{13})	工业SO_2、工业氮氧化物、工业颗粒物排放量	10^3kg	0.023***	0.098***	0.075
	公众环境关注度(X_{14})	百度雾霾搜索指数	−	0.154***	0.198***	0.044
	城市绿化率(X_{15})	建成区绿化覆盖率	%	0.014***	0.185***	0.171

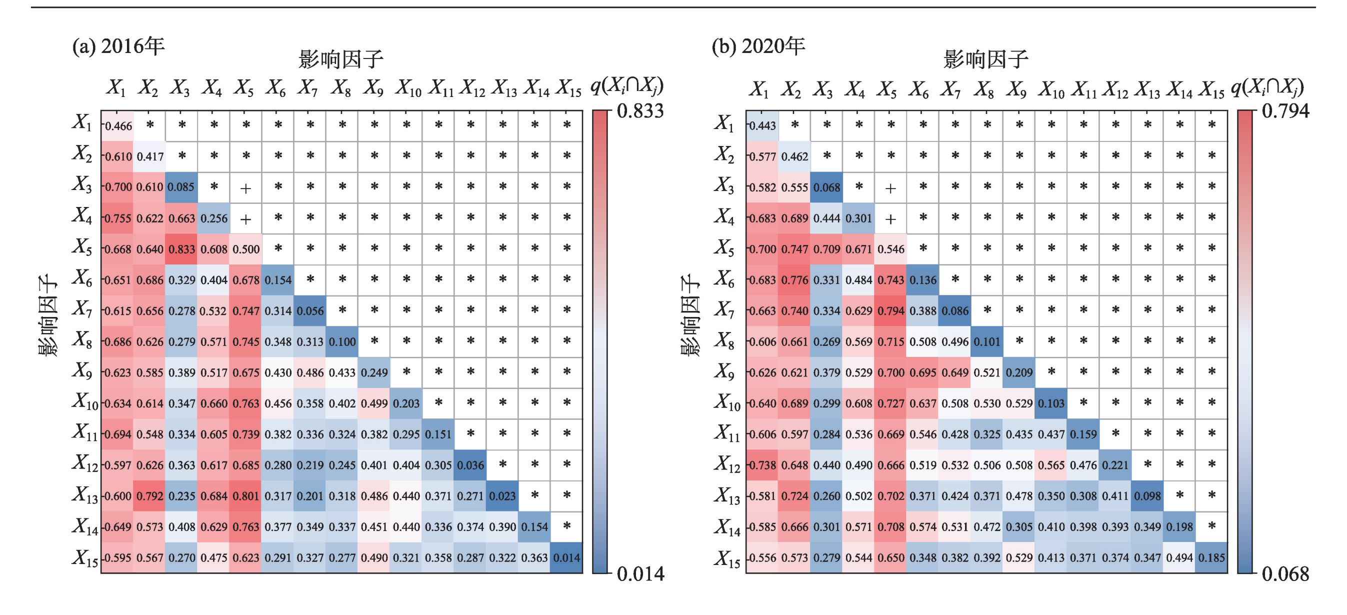
注：WAVI为各城市地形起伏度均值；NDVI为归一化植被指数；NPP为植被净初级生产力；GDP为国内生产总值；q为地理探测器分异探测结果。

3.1.1 自然地理因素 黄河流域所处的区域自然地理环境为$PM_{2.5}$污染的扩散、传输和稀释提供基础性支撑作用。从表2可知，2016年和2020年$PM_{2.5}$污染的驱动力前4强的因子相同，均是自然地理因素，其中影响力最强的均是净第一性生产力，植物在单位面积和单位时间上通过光合作用吸附$PM_{2.5}$，具有显著消减空气中$PM_{2.5}$的含量，有效改善城市群环境质量的功能，是地表碳循环的关键组分[50]。地形起伏度、气温和植被覆盖指数也是驱动力较强的自然地理因子。其中，地形起伏度与$PM_{2.5}$总体上呈负相关，黄河流域中西部城市群由于地形等原因不利于人口和工业聚集，对外来$PM_{2.5}$污染阻碍作用突出，而下游城市群地势平坦，利于开展大规模工业活动，也易造成$PM_{2.5}$污染的扩散[51]。地形起伏度还影响着地表风速和环流场，使所受的气流容易形成逆温层。当环流场静稳天气条件时，大气边界层无风或小风速对北方城市冬季逆温层和雾霾重污染天气的形成都有直接关系[52]。气温对$PM_{2.5}$的影响主要表现在时空两方面：时间上表现为对$PM_{2.5}$扩散和稀释，空间上表现为促进不同污染物间的转化和二次污染物的产生[53]。较高的植被覆盖有利于$PM_{2.5}$的沉降、阻滞、吸附和吸入[54]。

3.1.2 社会经济因素 城市是$PM_{2.5}$污染的主要来源地，因此$PM_{2.5}$具有人口分布与经济发展的指向性，在2016年和2020年影响因子分异探测结果差异变化较大的前5个因素中，其中前4强均为社会经济因子，表明社会经济因素提供$PM_{2.5}$空间分布的导向性驱动特征。2016年社会经济主控驱动因子是人口规模，而2020年为能源效率，但人口规模驱动影响力依然很大，紧随其后。随着城市群规模的扩张，首先表现在城市人口规模的急剧膨胀，导致更多能源消耗的增加，且黄河流域各城市群能源消费中的煤炭占比较大，导致烟尘和粉尘排放量增多，更加剧了$PM_{2.5}$污染[55]。公众环境关注度有效发挥了非正式环境规制的约束作用，形成政府、企业、公众良性互动的环境治理结构[56]。

3.2 交互探测分析

利用地理探测器的交互作用探测，得到因子间互耦互馈关系对黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$空间分布的影响解释力，结果为双因子增强或非线性增强2种类型（图5）。如图5所示，交互作用探测结果2016年排在前3的组合为：$X_3∩X_5$（0.833）、$X_5∩X_{13}$（0.801）、$X_2∩X_{13}$（0.792）。2020年排在前3的组合为：$X_5∩X_7$（0.794）、$X_2∩X_6$（0.776）、$X_2∩X_5$（0.747）。其



注：X_1~X_{15}含义见表2；*表示非线性增强，$q(X_i∩X_j)>X_i+X_j$；+表示双因子交互增强，$q(X_i∩X_j)>\mathrm{Max}(X_i, X_j)$。

图5　黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$空间分布影响因子间交互作用探测结果

Fig. 5　Interaction detection results of influencing factors of $PM_{2.5}$ spatial distribution in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin

中，X_5分别与其他因子交互作用探测的解释力均大于其单因子分异探测的影响力，这也与其在分异探测中影响力最强相一致。2016年和2020年的双因子交互增强类型均为：$X_5∩X_3$、$X_5∩X_4$。在分异探测中，对$PM_{2.5}$空间分布影响最大的因子为X_5，但在双因子增强类型中，解释力最强的组合为$X_5∩X_3$，解释力明显提高。总之，当X_5分别与其他因子交互作用探测后对$PM_{2.5}$空间分布的解释力均明显提高，当两因子具有明显的空间分异时就会显著增强$PM_{2.5}$分布的空间异质性。这也表明X_5对$PM_{2.5}$空间分布变化具有极为重要的影响解释力，因为城市园林绿植可以吸附、吸收$PM_{2.5}$等颗粒物，是降低空气中氮氧化合物含量的有效措施，是净化空气的有效途径，对消减近地表的$PM_{2.5}$发挥着重要作用[57]。

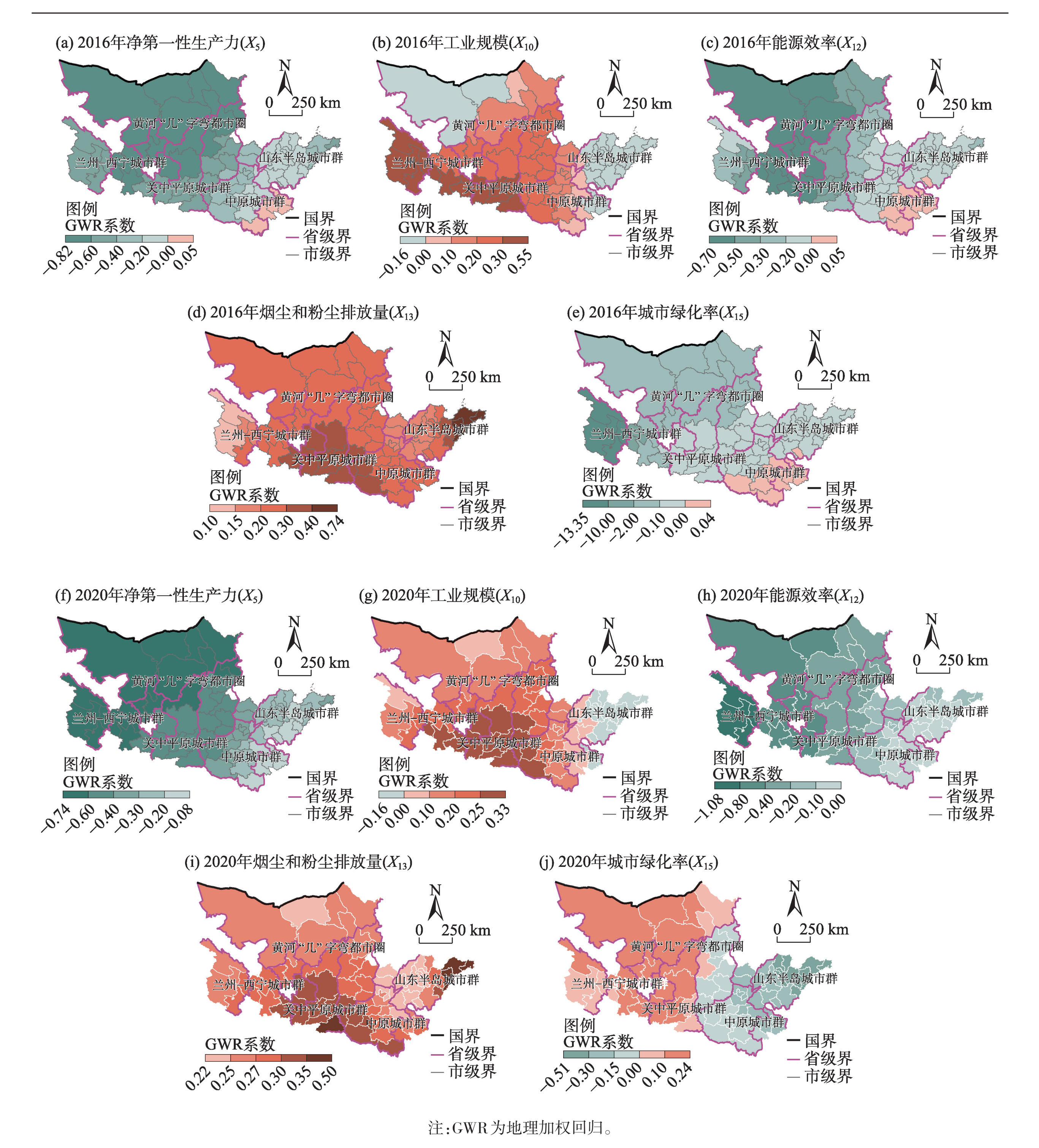
3.3　地理加权回归分析

2016年和2020年分异探测结果差距较大的前5个因子为：$X_{12}>X_{15}>X_{10}>X_{13}>X_5$。本文对地理探测器中分异探测解释力5 a间变化最大的前5个因子进行地理加权回归模型拟合，通过地理加权回归中的回归系数来分析影响因子作用方向和强度的时空差异(图6)。

(1) 2016年，X_{10}和X_{13}系数整体上为正，对5大城市群$PM_{2.5}$污染起到增强的正效应。X_5、X_{12}和X_{15}的回归系数整体上为负，对$PM_{2.5}$污染起到了抑制的负效应；2020年，X_5和X_{12}对$PM_{2.5}$污染起到了抑制的负效应，X_{10}和X_{13}对$PM_{2.5}$污染具有增强的正效应，X_{15}对黄河流域城市群东部$PM_{2.5}$污染起到了抑制的负效应，对西部地区有微弱增强的正效应。总体上看，5 a间各因子对5大城市群$PM_{2.5}$污染的负效应不断提高、正效应呈下降趋势。

(2) 社会经济因子方面，2016—2020年5 a间X_{12}对$PM_{2.5}$污染发挥的抑制作用呈现以黄河流域中部向外围扩散的势态，说明5大城市群在“双碳”目标下，进行能源绿色低碳转型发展取得了阶段性成效。X_{15}对$PM_{2.5}$污染的影响效应呈两极反转趋势，2016年对黄河流域城市群的西部城市固碳减排具有突出贡献，而对东部城市并不显著，但这一特征在2020年发生了反转，在自然地理环境加持下，东部的城市比西部更利于通过城市景观改善提升固碳减排效应。X_{10}的回归系数由负转正的区域逐渐扩大，说明目前工业增长依赖高能耗高污染行业未从根本扭转。X_{13}回归系数5 a内总体为正，说明燃煤、土壤尘、机动车排放、生物质燃烧、二次硫酸盐、硝酸盐等产生的烟尘和粉尘一直是城市$PM_{2.5}$的主要贡献源未得到明显改善[58]，这一因子对关中平原城市群$PM_{2.5}$污染的增强正效应表现明显。

(3) 自然地理因子方面，X_5回归系数2个年份对$PM_{2.5}$污染的影响在空间上整体均为负向，特别是在兰州-西宁城市群和黄河“几”字弯城市群，对$PM_{2.5}$的抑制作用更加显著。



注:GWR为地理加权回归。

图6 2016、2020年黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$影响因子回归系数分布

Fig. 6 Distribution of regression coefficients of $PM_{2.5}$ impact factors in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin in 2016 and 2020

$PM_{2.5}$导致的空气污染由自然地理因素(外因)与社会经济因素(内因)共同作用,黄河流域5大城市群内部污染物排放是$PM_{2.5}$污染的内因,净第一性生产力、地形起伏度、气温、植被覆盖指数、降水量等自然地理因素是黄河流域5大城市群$PM_{2.5}$污染集聚与扩散的外因。由于不同区域下$PM_{2.5}$污染的主导因素差异较大,导致没有一个标准统一的答案。虽然通过本文的定量分析,自然地理因素的影响驱动力略大,但很难进行大范围的变动。社会经济因素则可以根据黄河流域5大城市群每个地区实际制

定有针对性的宏观调控政策，例如兰州-西宁城市群制定推动工业结构调整和产业链延伸政策；黄河“几”字弯都市圈优化调整产业结构，降低煤炭消费比重；关中平原城市群提高使用清洁能源比例，优化临汾和运城等城市的能源产业结构；中原城市群优化人口分布、调整产业结构、出台严格的生态环境保护条例等；山东半岛城市群调整优化产业、能源和运输结构，加强$PM_{2.5}$和臭氧协同控制。

4 结论与建议

4.1 结论

（1）2016—2020年5大城市群的$PM_{2.5}$年均值的变化大体呈倒“N”型，总体呈现逐步下降态势。$PM_{2.5}$季均值变化总体呈先降后升的周期规律性的“U”型，总体呈冬高夏低、春秋居中的季节变化态势。

（2）在空间分布上，大致形成了黄河流域下游>中游>上游的梯度递减空间分布格局。除关中平原城市群外，其他4大城市群$PM_{2.5}$变化均有逐渐下降的趋势，表明“十三五”时期黄河流域大气污染防治取得较好效果。

（3）5大城市群$PM_{2.5}$经过5 a的演变表现出的空间自相关性各不同，但整体上呈正自相关集聚分布。使用局部空间自相关进一步探测5大城市群$PM_{2.5}$空间集聚类型主要为高-高集聚、低-低集聚和低-高集聚类型。从演变趋势来看，高污染区范围在不断缩小。

（4）利用地理探测器的分异探测，得出2016年和2020年影响因子驱动力共同反映出自然地理因素比社会经济因素的驱动力更强。利用交互作用探测，得到的结果为双因子增强或非线性增强2种类型。

（5）通过地理加权回归中的回归系数对地理探测器中分异探测解释力最强的前5个因子进行地理加权回归模型拟合，分析影响因子作用方向和强度的时空差异。社会经济因子方面，工业规模、烟尘和粉尘排放量是$PM_{2.5}$污染的主要来源，能源效率发挥的负效应呈现以黄河流域中部向外围扩散的势态，城市绿化率的影响效应呈两极反转趋势。自然地理因子方面，净第一性生产力回归系数2个年份对$PM_{2.5}$污染的影响在空间上整体均为负向，说明该因子对5大城市群$PM_{2.5}$污染起到了显著的抑制效应。

4.2 建议

党的二十大报告提出，深入推进环境污染防治，持续深入打好蓝天、碧水、净土保卫战，基本消除重污染天气。虽然“十三五”黄河流域$PM_{2.5}$污染呈持续改善态势，但部分城市群以重化工为主的产业结构、以煤为主的能源结构、以公路为主的交通结构还未根本扭转，实现“双碳”目标任务艰巨。“十四五”已进入大气污染治理的深水区，$PM_{2.5}$污染防治工作任重道远。对此，提出如下建议：

（1）建立黄河流域上中下游5大城市群应对$PM_{2.5}$污染联建联防联控联治的合作机制。根据上中下游5大城市群不同大气污染物排放源，因地制宜制定不同的防治政策，同时增强城市群之间分工协作、协调发展，形成高效合力的城市群治理新格局。

（2）构建政府主导、企业履责和公民参与的$PM_{2.5}$污染治理体系。发挥政府生态职能，通过环境规制推动经济社会全面绿色转型；利用市场机制和舆论监督，强化新时代高耗能高排放企业履约社会责任；增强公民参与环保的主体意识，形成节能减排的良好社会氛围。

（3）落实“双碳”目标，分类施策，精准推进，深化$PM_{2.5}$污染治理工作。上游兰州-西宁城市群推动工业绿色转型发展，提高资源利用水平，禁止高能耗高污染高排放产业和低端制造业发展；中上游黄河“几”字弯都市圈推动能源结构实现低碳转型，严控煤炭消费增长；中游关中平原城市群和下游中原城市群优化产业结构布局，持续推动钢铁、化工等行业强制性清洁生产；下游山东半岛城市群积极推进大气污染排污权市场化交易，探索拓展建立跨流域或全国性的大气污染物排污权交易制度。5大城市群协力持续推动冬季清洁取暖改造，普及集中供暖，建设生物质能等分布式新型供暖方式，改变$PM_{2.5}$污染较强的季节性变化特征。

（4）坚持生态优先、绿色发展，构建黄河流域“五极”发展动力格局。5大城市群是区域经济发展增长极和黄河流域人口、生产力布局的主要载体，扎实推动黄河流域成为我国生态优先绿色发展的主战场，促进“五极”间要素合理流动和高效集聚，

持续深入打好打赢蓝天保卫战,以高品质生态环境支撑黄河流域高质量发展。

参考文献(References)

[1] 王利伟. 共绘黄河流域高质量发展画卷[N]. 光明日报, 2021-10-16(5). [Wang Liwei. Co drawing a high-quality development picture of the Yellow River Basin[N]. Guangming Daily, 2021-10-16(5).]

[2] 黄承梁. 推动黄河流域生态保护和高质量发展[J]. 红旗文稿, 2022(8): 15-17. [Huang Chengliang. Promoting ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin[J]. Red Flag Manuscript, 2022(8): 15-17.]

[3] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部通报2021年12月和1—12月全国地表水、环境空气质量状况[EB/OL]. [2022-08-19]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202201/t20220131_968703.shtml. [Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Ministry of Ecology and Environment reported the state of surface water and ambient air quality in December and from January to December 2021[EB/OL]. [2022-08-19]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202201/t20220131_968703.shtml.]

[4] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区$PM_{2.5}$时空演变格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2614-2630. [Wang Zhenbo, Liang Longwu, Wang Xujing. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Chinese urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2614-2630.]

[5] 杨新兴, 冯丽华, 尉鹏. 大气颗粒物$PM_{2.5}$及其危害[J]. 前沿科学, 2012, 6(1): 22-31. [Yang Xinxing, Feng Lihua, Wei Peng. Air particulate matter $PM_{2.5}$ and its harm[J]. Frontier Science, 2012, 6(1): 22-31.]

[6] 杨洪斌, 邹旭东, 汪宏宇, 等. 大气环境中$PM_{2.5}$的研究进展与展望[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(3): 77-82. [Yang Hongbin, Zou Xudong, Wang Hongyu, et al. Study progress on $PM_{2.5}$ in atmospheric environment[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(3): 77-82.]

[7] 郝吉明, 尹伟伦, 岑可法. 中国大气$PM_{2.5}$污染防治策略与技术途径[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [Hao Jiming, Yin Weilun, Cen Kefa. Strategies and technical approaches for the prevention and control of atmospheric $PM_{2.5}$ pollution in China[M]. Beijing: Science Press, 2016.]

[8] 生态环境部. 关于发布国家环境质量标准《环境空气质量标准》的公告[EB/OL]. [2022-08-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201203/t20120302_224145.htm. [Ministry of Ecology and Environment. Announcement on the issuance of the national environmental quality standard ambient air quality standard[EB/OL]. [2022-08-20]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201203/t20120302_224145.htm.]

[9] 祝玉敏. 新《环境空气质量标准》与$PM_{2.5}$——访环境保护部科技标准司司长赵英民[J]. 世界环境, 2012(1): 14-15. [Zhu Yumin. New "Air Quality Standard" & $PM_{2.5}$[J]. World Environment, 2012(1): 14-15.]

[10] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, et al. Chemical characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10): 3148-3155.

[11] 熊欢欢, 梁龙武, 曾赠, 等. 中国城市$PM_{2.5}$时空分布的动态比较分析[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 136-146. [Xiong Huanhuan, Liang Longwu, Zeng Zeng, et al. Dynamic analysis of $PM_{2.5}$ spatial-temporal characteristics in China[J]. Resource Science, 2017, 39(1): 136-146.]

[12] Pinto J P, Lefohn A S, Shadwick D S. Spatial variability of $PM_{2.5}$ in urban areas in the United States[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54(4): 440-449.

[13] Khan M M, Zaman K, Irfan D, et al. Triangular relationship among energy consumption, air pollution and water resources in Pakistan[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 112: 1375-1385.

[14] 汪克亮, 孟祥瑞, 杨宝臣, 等. 技术异质下中国大气污染排放效率的区域差异与影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(1): 101-110. [Wang Keliang, Meng Xiangrui, Yang Baochen, et al. Regional differences and influencing factors of China's air pollution emission efficiency considering technological heterogeneity[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, 27(1): 101-110.]

[15] Stern D I, Common M S, Barbier E B. Economic growth and environmental degradation: The environmental Kuznets curve and sustainable development[J]. World Development, 1996, 24(7): 1151-1160.

[16] 马丽梅, 张晓. 中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J]. 中国工业经济, 2014(4): 19-31. [Ma Limei, Zhang Xiao. The spatial effect of China's haze pollution and the impact from economic change and energy structure[J]. China Industrial Economics, 2014(4): 19-31.]

[17] Cardelino C A, Chameides W L. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1990, 95(D9): 13971-13979.

[18] 彭迪云, 刘畅, 周依仿. 长江经济带城镇化发展对雾霾污染影响的门槛效应研究——基于居民消费水平的视角[J]. 金融与经济, 2015(8): 36-42. [Peng Diyun, Liu Chang, Zhou Yifan. Threshold effect of urbanization development on haze pollution in the Yangtze River Economic Belt: From the perspective of residents' consumption level[J]. Finance and Economy, 2015(8): 36-42.]

[19] Brimblecombe P. Air pollution in industrializing England[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 1978, 28(2): 115-118.

[20] 何枫, 马栋栋. 雾霾与工业化发展的关联研究——中国74个城市的实证研究[J]. 软科学, 2015, 29(6): 110-114. [He Feng, Ma Dongdong. Association study between haze pollution and industrialization: An empirical study based on 74 cities in China[J]. Soft Science, 2015, 29(6): 110-114.]

[21] Walsh M P. $PM_{2.5}$: Global progress in controlling the motor vehicle contribution[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineer-

ing, 2014, 8(1): 1-17.

[22] 魏巍贤, 马喜立. 能源结构调整与雾霾治理的最优政策选择[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(7): 6-14. [Wei Weixian, Ma Xili. Optimal policy for energy structure adjustment and haze governance in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(7): 6-14.]

[23] Guan D B, Su X, Zhang Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary $PM_{2.5}$ emissions[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(2): 024010, doi: 10.1088/1748-9326/9/2/024010.

[24] 康雨. 贸易开放程度对雾霾的影响分析——基于中国省级面板数据的空间计量研究[J]. 经济科学, 2016(1): 114-125. [Kang Yu. The impact of trade openness on haze: A spatial econometric study based on China's provincial panel data[J]. Economic Science, 2016(1): 114-125.]

[25] 冷艳丽, 冼国明, 杜思正. 外商直接投资与雾霾污染——基于中国省际面板数据的实证分析[J]. 国际贸易问题, 2015(12): 74-84. [Leng Yanli, Xian Guoming, Du Sizheng. Foreign direct investment and haze pollution: An empirical analysis based on provincial panel data[J]. Journal of International Trade, 2015(12): 74-84.]

[26] Small K A, Kazimi C. On the costs of air pollution from motor vehicles[J]. University of California Transportation Center, Working Papers, 1995(6): 7-32.

[27] 周峤. 雾霾天气的成因[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(增刊 1): 211-212. [Zhou Qiao. Cause of the haze weather[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(Suppl. 1): 211-212.]

[28] 张军, 金梓函, 王玥, 等. 关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变格局及其影响因素[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5333-5343. [Zhang Jun, Jin Zihan, Wang Yue, et al. Temporal and spatial evolution pattern of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. Environmental Science, 2022, 43(12): 5333-5343.]

[29] 刘笑杰, 王丽丽, 何博汶, 等. 长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空演变及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(3): 647-658. [Liu Xiaojie, Wang Lili, He Bowen, et al. Spatiotemporal evolution and drivers of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(3): 647-658.]

[30] 贺斌, 袁晓玲, 张跃胜. 中国城市 $PM_{2.5}$ 驱动因素的时空异质性研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(22): 53-56. [He Bin, Yuan Xiaoling, Zhang Yuesheng. Spatio temporal heterogeneity of driving factors of $PM_{2.5}$ in Chinese cities[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(22): 53-56.]

[31] 耿佳辰, 沈石, 程昌秀. "十三五"时期黄河流域 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及多尺度社会经济影响机制分析[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(6): 1163-1175. [Geng Jiachen, Shen Shi, Cheng Changxiu. Spatio-temporal evolution and the multi-scale socio-economic influencing mechanism of $PM_{2.5}$ in the Yellow River Basin during the China's 13th Five-Year Plan[J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(6): 1163-1175.]

[32] 尹承美, 何建军, 于丽娟, 等. 多尺度气象条件对济南 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. 高原气象, 2019, 38(5): 1120-1128. [Yin Chengmei, He Jianjun, Yu Lijuan, et al. The impact of multi-scale meteorological conditions on $PM_{2.5}$ pollution over Ji'nan[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(5): 1120-1128.]

[33] 孟昭阳, 张怀德, 蒋晓明, 等. 太原地区冬春季 $PM_{2.5}$ 污染特征及影响因素[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(5): 648-656. [Meng Zhaoyang, Zhang Huaide, Jiang Xiaoming, et al. The characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors during winter and spring in Taiyuan[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(5): 648-656.]

[34] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1619-1628. [Wang Xin, Nie Yan, Chen Hong, et al. Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou City[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1619-1628.]

[35] 王昭, 严小兵. 长江三角洲城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1497-1506. [Wang Zhao, Yan Xiaobing. Temporal-spatial evolution of $PM_{2.5}$ and driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1497-1506.]

[36] 周侗, 张帅倩, 闫金伟, 等. 长江经济带三大城市群 $PM_{2.5}$ 时空分布特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 878-889. [Zhou Dong, Zhang Shuaiqian, Yan Jinwei, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors of the three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(4): 878-889.]

[37] 贾卓, 强文丽, 王月菊, 等. 兰州-西宁城市群工业污染集聚格局及其空间效应[J]. 经济地理, 2020, 40(1): 68-75, 84. [Jia Zhuo, Qiang Wenli, Wang Yueju, et al. The spatial characteristics and spatial effect of industrial pollution agglomeration in Lanzhou-Xining Urban Agglomeration[J]. Economic Geography, 2020, 40(1): 68-75, 84.]

[38] 李衡, 韩燕. 黄河流域 $PM_{2.5}$ 时空演变特征及其影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2022, 31(1): 130-141. [Li Heng, Han Yan. Analysis on the spatial-temporal evolution characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. World Regional Studies, 2022, 31(1): 130-141.]

[39] 杨小林, 陈艺晏, 李义玲, 等. 黄河流域城市 $PM_{2.5}$ 时空异质及空间溢出效应研究[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(10): 1208-1215, 1223. [Yang Xiaolin, Chen Yiyan, Li Yiling, et al. Research on the spatial-temporal heterogeneity and spatial spillover effects of urban $PM_{2.5}$ in the Yellow River Basin[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(10): 1208-1215, 1223.]

[40] 王晶晶, 程钰. 黄河流域技术创新对 $PM_{2.5}$ 的影响及其空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(9): 108-118. [Wang Jingjing, Cheng Yu. Impact of technological innovation on $PM_{2.5}$ and its spatial spillover effect in the Yellow River Basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(9): 108-118.]

[41] 内蒙古自治区统计局. 黄河"几"字弯都市圈比较分析[EB/OL]. [2023-05-13]. http://tj.nmg.gov.cn/tjdt/fbyjd_11654/202204/t20220422_2043235.html. [Inner Mongolia Autonomous Region Statistics Bureau. Comparative analysis in the Yellow River Jiziwan Metropolitan Area[EB/OL]. [2023-05-13]. http://tj.nmg.gov.cn/tjdt/fbyjd_11654/202204/t20220422_2043235.html.]

[42] 崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系[J]. 经济地理, 2015, 35(7): 72-78. [Cui Muhua. The relationship of coupling coordination between urbanization and ecological environment: A case of urban cluster in the Central Plains[J]. Economic Geography, 2015, 35(7): 72-78.]

[43] 王富喜. 山东半岛城市群人口-土地城镇化质量测度与协调发展研究[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1345-1354. [Wang Fuxi. Study on the quality measurement and coordinated development of population-land urbanization in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1345-1354.]

[44] 江娟丽, 杨庆媛, 张忠训, 等. 重庆市非物质文化遗产的空间格局及旅游开发模式[J]. 经济地理, 2019, 39(6): 205-213. [Jiang Juanli, Yang Qingyuan, Zhang Zhongxun, et al. Spatial distribution pattern of intangible cultural heritage and tourism development in Chongqing[J]. Economic Geography, 2019, 39(6): 205-213.]

[45] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[46] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(9): 1356-1366. [Lu Binbin, Ge Yong, Qin Kun, et al. A review on geographically weighted regression[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9): 1356-1366.]

[47] 张碧辉, 王若嘉. "雾霾灰"持续减少, 原因几何[N]. 中国气象报, 2020-04-30(3). [Zhang Bihui, Wang Ruojia. "Haze ash" continues to decrease, and the reason is geometric[N]. China Meteorological News, 2020-04-30(3).]

[48] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 黄河流域$PM_{2.5}$时空特征及驱动因素[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(4): 427-435, 442. [Wang Lili, Liu Xiaojie, Li Ding, et al. Spatial-temporal characteristics and drivers of $PM_{2.5}$ in the Yellow River Basin[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2022, 58(4): 427-435, 442.]

[49] 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 等. 汾渭平原临汾市2019年春节期间大气污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5122-5130. [Liu Weijie, Hu Tianpeng, Mao Yao, et al. Characteristics and origin analysis of air pollution during the spring festival in Linfen, Fenwei Plain[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5122-5130.]

[50] 陈小平, 焦奕雯, 裴婷婷, 等. 园林植物吸附细颗粒物$PM_{2.5}$效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2558-2566. [Chen Xiaoping, Jiao Yiwen, Pei Tingting, et al. The effect of adsorbing fine particulate matter ($PM_{2.5}$) by garden plants: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9): 2558-2566.]

[51] 滕堂伟, 谌丹华, 胡森林. 黄河流域空气污染的空间格局演化及影响因素[J]. 地理科学, 2021, 41(10): 1852-1861. [Teng Tangwei, Chen Danhua, Hu Senlin. Spatial evolution and influencing factors of spatial agglomeration pattern of air pollution in the Yellow River Basin[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(10): 1852-1861.]

[52] 胡淑兰, 胡琳, 程路, 等. 陕西关中重污染天气低空流场的分型研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 122-130. [Hu Shulan, Hu Lin, Cheng Lu, et al. Low-level streamline field typing of heavy pollution weather of Guanzhong region in Shaanxi Province[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 122-130.]

[53] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原$PM_{2.5}$浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3539-3548. [Huang Xiaogang, Shao Tianjie, Zhao Jingbo, et al. Influence factors and spillover effect of $PM_{2.5}$ concentration on Fen-wei Plain[J]. China Environmental Science, 2019, 39(8): 3539-3548.]

[54] 中国气象学会. 森林使北京年"增蓝"半月 减$PM_{2.5}$上百吨[EB/OL]. [2023-08-05]. http://www.cms1924.org/WebPage/WebPageDetail_76_123_2324.aspx. [Chinese Meteorological Society. Forests reduce $PM_{2.5}$ by hundreds of tons in half a month of Beijing's annual "blue increase"[EB/OL]. [2023-08-05]. http://www.cms1924.org/WebPage/WebPageDetail_76_123_2324.aspx.]

[55] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 177-191. [Liu Haimeng, Fang Chuanglin, Huang Jiejun, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 177-191.]

[56] 吴力波, 杨眉敏, 孙可哿. 公众环境关注度对企业和政府环境治理的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 1-14. [Wu Libo, Yang Meimin, Sun Kege. Impact of public environmental attention on environmental governance of enterprises and local governments[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(2): 1-14.]

[57] 季静, 王罡, 杜希龙, 等. 京津冀地区植物对灰霾空气中$PM_{2.5}$等细颗粒物吸附能力分析[J]. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(8): 694-699. [Ji Jing, Wang Gang, Du Xilong, et al. Evaluation of adsorbing haze $PM_{2.5}$ fine particulate matters with plants in Beijing-Tianjin-Hebei region in China[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2013, 43(8): 694-699.]

[58] 杨春雪, 阚海东, 陈仁杰. 我国大气细颗粒物水平、成分、来源及污染特征[J]. 环境与健康杂志, 2011, 28(8): 735-738, 753. [Yang Chunxue, Kan Haidong, Chen Renjie. Research on level, composition, source and pollution characteristics of ambient fine particles in China[J]. Journal of Environment and Health, 2011, 28(8): 735-738, 753.]

Spatiotemporal evolution and influencing factors of $PM_{2.5}$ in the five urban agglomerations in the Yellow River Basin

MU Shilei[1], YANG Yuhuan[2], Wuritaoketaohu[1]

(1. College of Ethnology and Anthropology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;
2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwestern University, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: This study focuses on 82 cities in five major urban agglomerations in the Yellow River Basin and uses $PM_{2.5}$ data published by the China National Environmental Monitoring Centre from 2016 to 2020. Spatial autocorrelation, geographic detectors, and geographically weighted regression methods were employed to investigate the spatiotemporal distribution characteristics and main driving factors of spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$. This provides a reference for relevant departments to improve atmospheric pollution prevention and control policies. The results are as follows: (1) The change in the annual mean of $PM_{2.5}$ roughly follows an inverted "N" shape, and the seasonal mean changes in a "U" shape with a periodicity of first decreasing and then increasing. (2) In terms of spatial distribution, a gradient-decreasing pattern is formed from downstream to midstream to upstream of the Yellow River, exhibiting a gradually decreasing trend. (3) $PM_{2.5}$ exhibits positive spatial autocorrelation and overall aggregation distribution over the five years, with high-high, low-low, and low-high agglomeration types. (4) Natural geographical factors have a stronger driving force on $PM_{2.5}$ spatial differentiation than socio-economic factors in 2016 and 2020. The interaction results show two types: bi-factor and nonlinear strengthening. (5) The geographically weighted regression model is used to fit the five factors with the largest explanatory power for differentiation. The negative effects of each factor on $PM_{2.5}$ pollution in the five urban agglomerations have increased, whereas the positive effects have decreased over the past 5 years. Significant differences in spatial direction and strength were observed.

Key words: the Yellow River Basin; $PM_{2.5}$; urban agglomeration; ecological protection; high-quality development